

(解説)

HIP装置の新技术紹介

Introduction of New Technology for HIP Equipment



渡邊克充*1

Katsumi WATANABE

A new rapid cooling method has recently been developed to shorten the cooling time and, consequently, the total process time to improve the productivity of the HIP process. This paper describes the new technology of a HIP equipment employing this new rapid cooling method and comments on its future potential.

まえがき = 熱間等方圧加圧 (Hot Isostatic Pressing, 以下HIPという) は、ガスにより高い圧力と高温を同時に処理物へ加える技術である。HIP技術を応用したHIP装置は、焼結体の緻密化、鋳造品の巣や気孔の除去、金属粉末の高密度焼結、および異種材料の拡散接合などに不可欠な技術として利用されている。これまで当社は350台以上のHIP装置の納入実績があり、現在では国内シェアトップの高圧HIP装置メーカーとしてその地位を確立している。

当社におけるHIP装置技術のルーツは高圧技術の基礎研究開発にあり、1950年代前半の14,000気圧の増圧機を活用した液体を対象とする高圧容器の強度研究に端を発している。その後、高圧シール機構、圧力測定技術などの高圧要素技術をベースに、総合的高圧技術集団として先導的地位を占めるに至っており、HIP装置、CIP (冷間等方圧加圧: Cold Isostatic Pressing) 装置、熱間静水圧押出装置、圧力晶析装置、固体圧合成装置など、多様な装置を開発・商品化してきた。

HIP装置の開発における課題の一つは、新素材などの処理に要求される仕様に関するものであり、窒化ケイ素などの高温高強度セラミックスの処理に必要な1,700℃以上の高温発生、窒化ケイ素を高温下で熱分解を防止しつつ処理するための圧媒としての窒素の使用、あるいは高温酸化物超伝導体処理のための酸素雰囲気HIP装置などがある。いっぽうで、生産用装置としての課題は、処理コスト低減のための生産性向上を目的としたものが中心であり、余熱方式HIP装置、モジュラHIP装置や急冷機能搭載HIP装置などが開発されてきた。高温窒素雰囲気HIP装置や、酸素雰囲気HIP装置、余熱HIP装置、モジュラHIP装置について、詳細は既報のとおりである^{1), 2)}。

本稿では、当社において新しく開発した、HIP処理の生産性向上を目的とした急速冷却方式について、その新技术を紹介する。

1. HIP装置の構成

HIP装置系統の概念図を図1に示す。HIP装置は、(1) 圧力容器、(2) 圧媒ガスの加圧、回収装置、(3) 圧力容器に内蔵した炉構造体、(4) 加熱電源および制御装置、(5) 安全装置などから構成している³⁾。HIP本体の概念図を図2に示す。圧力容器は通常、高圧円筒 (Pressure Vessel)、その両端をふさぐ蓋 (Closure)、および蓋に作用する荷重を指示するヨークフレームから構成している。高圧円筒は、鍛鋼製の単肉円筒または層成円筒、あるいは単肉円筒をピアノ線で補強した構造を使用する。圧力容器にはHIPの心臓部に当たる炉構造体が組み込まれている。炉構造体内部は発熱体 (Heating Element) によって1,000℃以上の処理温度となるが、圧力容器は一定の設計温度以下に保つ必要があるため、発

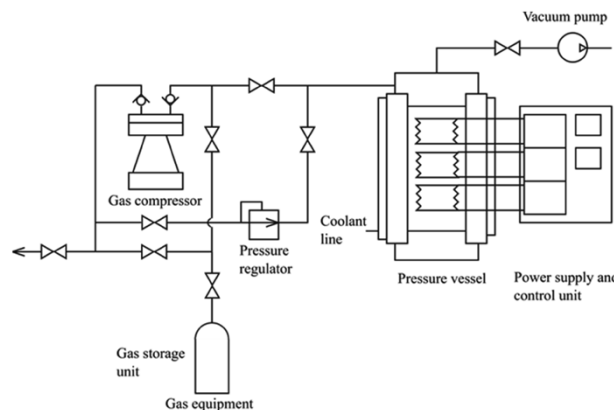


図1 HIP装置系統図

Fig. 1 System diagram of HIP equipment

*1 機械事業部門 産業機械事業部 重機械部

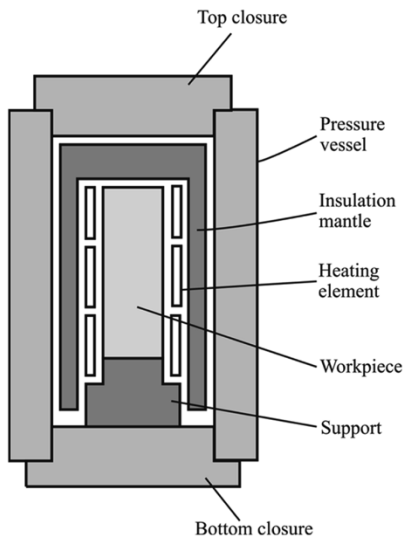


図2 HIP本体概念図
Fig. 2 Conceptual diagram of HIP equipment

熱体と圧力容器の間には断熱層（Insulation Mantle）を配置している。

2. HIP装置の生産性向上

HIP装置は高圧・高温ガスを用いることから、とくに大型装置では、昇圧、昇温、冷却のそれぞれの工程に長い時間が必要となる。したがって、HIP処理における生産性向上は、こうした昇圧、昇温、冷却の工程をいかに短縮するかに依存する。いっぽう、圧力容器を含めた高圧ガス系統の各機器が高価であり、昇圧系統における時間短縮には高いコストがかかる。このためHIP装置では、圧力容器内での昇温、冷却工程の短縮に主眼がおかれてきた。

昇温工程の短縮方法としては、余熱・高温取出方式、モジュラ方式などが開発されてきた。しかしながら、適用可能な製品に限られる、あるいは余熱設備やモジュラ設備にコストがかかるなどの理由から近年ではあまり使われていない。

大型装置では、サイクルタイムに占める冷却時間の割合が大きく、プロセス時間の3分の1程度を占める。このため、高速冷却を行っても製品品質上問題がない鍛造品や金属焼結品のHIP処理では、生産性向上のために、冷却速度を加速することによって冷却工程の短縮を図る急速冷却方式がとくに有効である²⁾。

3. 急速冷却方式

前述のようにHIP装置では、発熱体を配置している処理空間と圧力容器の間に、処理空間の高温から熱を遮断するための断熱層を配置している。HIP装置内の高圧・高温ガスは、例えば100 MPa、1,000℃の場合、密度が水の30%程度と非常に大きい。そのいっぽうで粘性は水の10%程度と小さく、かつ、熱膨張係数が大きいことから激しい対流を生じやすく、ガスの流動による熱伝達が非常に大きい。このため、断熱層はガスの対流を生じないような構造とし、ガスの流動による熱移動を遮断することによって圧力容器内面の温度が一定以下に保たれる

ように設計している。

冷却工程を短縮するためには、処理空間から圧力容器外への熱の移動を促進しなければならない。すなわち、処理空間から断熱層の外側へ熱を移動させるとともに、圧力容器の内側から圧力容器外側の冷却水へ同量の熱を移動させなければならない。断熱層によって制限されているガスの流動を、冷却過程のみ促進することができれば、処理空間から断熱層の外側への熱移動が多くなる。

ガスの流動を促進する方式（急速冷却方式）の一例を図3に示す。本図の構造では、処理空間から断熱層を貫通して断熱層外側へガスを流出させる流路が断熱層上部に設けられている。また、断熱層下部には、断熱層外側から処理空間へガスを流入させる流路が設けられている。当該流路にはバルブが設けられ、昇温中と温度保持中はバルブは閉じている。冷却過程ではバルブを開き、処理空間と断熱層外側の温度差によって処理空間内のガスは上部の流路から断熱層外側へ流出する。断熱層外側へ流出したガスは、圧力容器内壁で冷やされながら下方へ流れ、断熱層下部の流路から処理空間へ流入する。処理空間下部から流入したガスは、処理空間よりも低い温度となっているため処理空間を冷却し、処理空間内の温度を急速に下げる。

図4に急速冷却方式の別の例を示す。この図に示した構造では、図3で示したような断熱層を貫通する流路が断熱層上部にはない。その代わりに、処理空間から流出したガスを断熱層上部へ導くための整流筒が断熱層外側へ設けられている。温度の低いガスが断熱層下部から処理空間内へファンによって導かれる。処理空間から流出したガスは整流筒によって断熱層上部へ導かれ、圧力容器内壁で冷やされながら下部へ戻り、ファンによって再び処理空間内へ導かれる。この循環によって、図3に示した方法よりも処理空間内の温度を速く下げることができる。また、処理空間下部に配置したファンによって処理空間内部を攪拌（かくはん）しながら冷却することにより、処理空間内の温度を均一に保ったまま冷却できる。

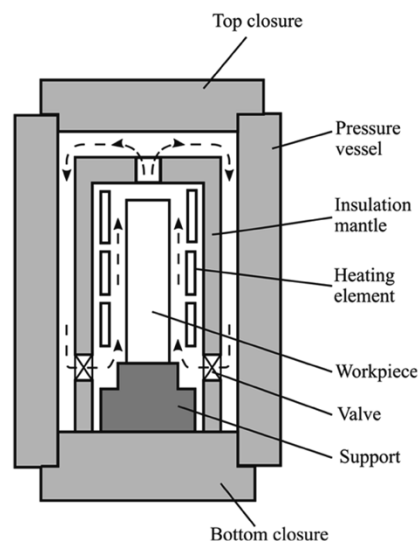


図3 急速冷却の原理¹⁾
Fig. 3 Principle of rapid cooling¹⁾

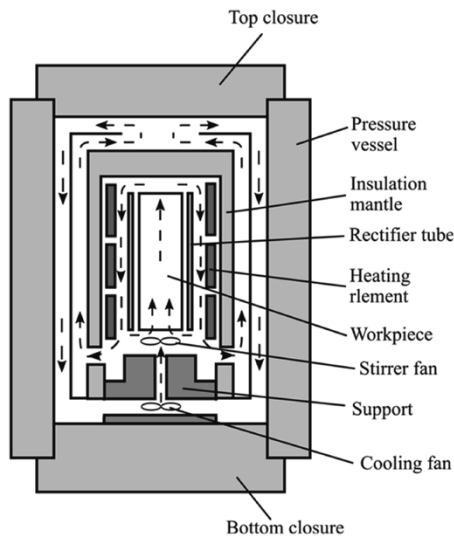


図4 急速冷却の原理²⁾
Fig. 4 Principle of rapid cooling²⁾

圧力容器内壁面を流れるガスは、図3に示した方法では自然対流である。いっぽうで、図4に示した方法はファンによる強制対流である。いずれの場合においても圧力容器内壁面を流れるガス流速が小さいので圧力容器内壁面の熱伝達係数が小さく、圧力容器上部のガス温度が高くなる。このため、ガスの温度と圧力容器上部内壁面の温度との差が大きくなり、ガスからの抜熱は主として容器上部でのみ行われることとなる。ガスが容器上部から下部へ移動する間にガス温度は低くなるため、容器下部の熱伝達量は少なくなって十分な抜熱ができなくなる。冷却速度を上げるためには、ガス流量を多くして圧力容器内壁面の熱伝達係数を大きくする必要があるが、その場合は圧力容器内壁温度が高くなる。圧力容器内壁温度は容器の設計温度によって制限されているため、ガス流量をあまり大きくすることはできない。すなわち、冷却速度は、容器の設計によって制限されることになる。

圧力容器内部の熱伝導を促進して容器内壁温度を上げにくくすれば、ガス流量を増やして冷却速度を上げることができる。これを実現するために開発されたのが内面冷却容器である。この容器は、内側に薄い鍛造円筒をコアとして配置し、その外側に補強のためのピアノ線を巻き付けた線巻き容器である。鍛造コアとピアノ線の間には冷却水を流すことにより、圧力容器内面から冷却水までの距離を短くすることができる。

4. 新開発の急速冷却方式

4.1 新型急速冷却方式の概要

前述のように図3および図4に示した方法では、ガスからの抜熱は容器上部でのみ行われる。このため、圧力容器内壁の冷却能力を最大限利用することは難しく、必ずしも効率が良いとはいえない。

この欠点を解消するため、新型急速冷却方式を開発した(図5)。この新型急速冷却方式では断熱層の内側・外側両方に整流筒を配置しており、二つの環流を備えることを特徴とする。二つの環流とは、ファンから外側整

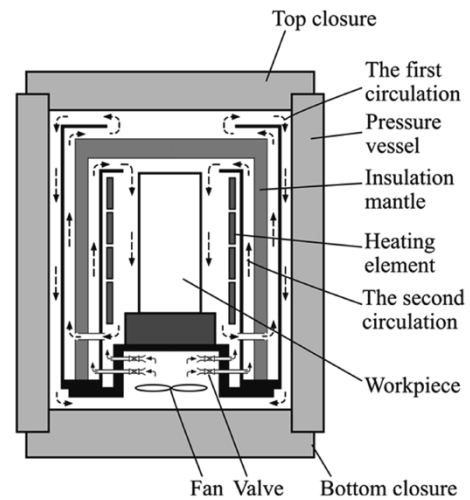


図5 新形急速冷却の原理
Fig. 5 Principle of advanced rapid cooling

流筒と断熱層の間を通過して断熱層上部から圧力容器と断熱層の間へ導かれ、圧力容器内壁で冷やされながら下降した後、ファンへ戻るガスの流れ(以下、第一環流という)と、ファンから内側整流筒と断熱層の間を通過して処理室上方へ導かれ、処理空間内の高温ガスを冷却した後、前述の第一環流と合流してファンへ戻るガスの流れ(以下、第二環流という)である。

第二環流のみであれば図4に示した急速冷却方式と同一であるが、これに第一環流を加えたことが大きな特徴の一つである。第一環流は処理空間内の冷却には直接的には関与せず、流量も冷却速度に影響しない。このため、冷却速度によらず圧力容器内壁面を流れるガス流速を十分大きくすることができ、圧力容器内壁面の熱伝達係数を大きくすることができる。また、圧力容器の上から下まで内面全体から抜熱することができ、圧力容器の抜熱能力を最大限利用することができる。さらに、ファンの後段に設置した制御弁によって第一環流と第二環流の流量割合を制御することができるようになっている。これによって断熱層上部のガス温度が一定になるように制御でき、冷却過程を通じて常に圧力容器内壁温度を運転可能な最大値に保持することができる。

これらの特徴により、冷却過程を通じて圧力容器からの抜熱量を最大かつ一定とすることができ、圧力容器その他の設計を同一とした場合、従来の急速冷却方式よりも冷却速度を速くすることができる。

4.2 新型急速冷却方式の性能実績

新型急速冷却方式の開発と並行して、内筒コアにスペーサを介してピアノ線を巻く構造を採用した線巻き内面冷却容器の開発を進めてきた。その成果を活用し、大型HIP用の実績として当社最大の線巻き内面冷却容器を搭載したHIP装置の1号機を2016年に納入した。本HIP装置の主仕様を表1に、また外観を図6に示す。このHIP装置用にはまた、空炉時急速冷却速度40°C/minおよび負荷2t搭載時急速冷却速度15°C/minを目標として、新型急速冷却方式を採用した加熱装置を設計、搭載した。本節では、本HIP装置の試運転時に取得したデータを基に、新型急速冷却方式の性能を紹介する。

表 1 新形急速冷却方式を搭載したHIP装置の仕様

Table 1 Specifications of HIP apparatus with new rapid-cooling method

Diameter of workzone	850 mm
Hight of workzone	2,500 mm
Maximum temperature	1,400 °C
Maximum pressure	147 MPa
Maximum superimposed load	4,500 kg

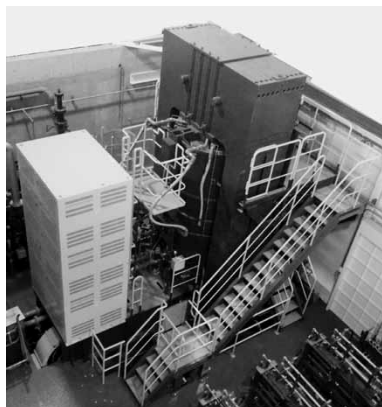


図 6 急速冷却搭載HIP装置
Fig. 6 HIP equipment with rapid cooling

本HIP装置によって約2t負荷した状態において、急速冷却を使わずに冷却した場合と、15°C/minで制御しながら急速冷却した場合との処理室内平均温度変化を調べた。図7にその実績値をプロットしたグラフを示す。破線は急速冷却を使わない自然冷却の場合であり、実線は急速冷却の場合である。図からわかるように、ガス回収工程を開始できる300°Cまで冷却するのに自然冷却では7時間近くかかっているのに対し、急速冷却ではおよそ1時間で冷却できている。この差の6時間がプロセス時間の短縮となる。この圧力・温度条件の場合、昇温・昇圧工程に4時間、ガス回収・放出工程に3時間かかる。このため、最高圧力・温度での保持時間を1時間とすると全プロセス時間は、自然冷却の場合では約15時間、急速冷却を使用した場合では約9時間である。この場合はおよそ4割の時間短縮であり、急速冷却によって大幅な生産性向上が達成できることを実証した。

4.3 超急冷法

通常のHIP装置では、処理空間内の熱は压力容器を介して压力容器外側に循環している冷却水へと伝わり、処理空間内を冷却する。冷却速度は压力容器の冷却能力（容器の持つ抜熱能力×抜熱の効率）によって決まる。压力容器の冷却能力を超える冷却速度としたい場合は、压力容器の内部に蓄熱器を配置し、压力容器の冷却能力を超える熱量を一時的に蓄熱器に蓄える方式が取られる。この方式を超急冷法と呼ぶ。蓄熱器は一般的に断熱層の外側に配置されるため、超急冷専用の炉構造体が必要となる。新型急速冷却方法では、つぎのような方法でこの問題を解決している。

HIP装置のヒータは、通常複数のゾーンに分けてそれぞれのゾーンの温度を別々に制御することによって全体の温度の均一性を確保している（図8）。大型装置では

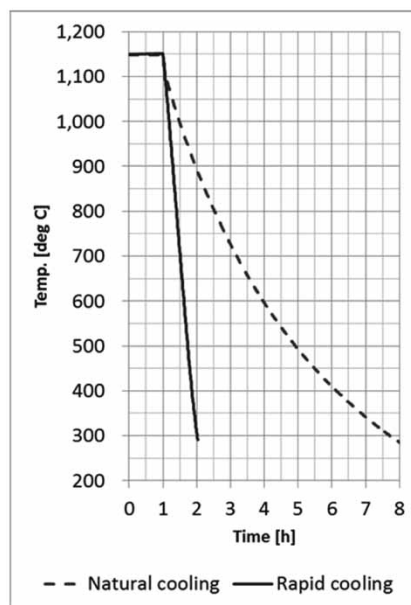


図 7 急速冷却の例

Fig. 7 Example of rapid cooling

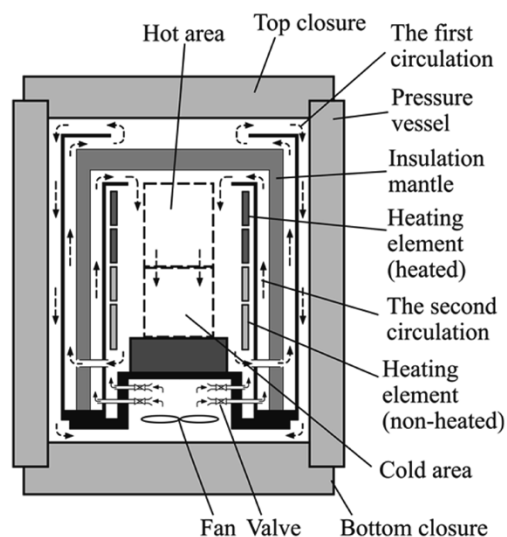


図 8 新形超急冷の原理

Fig. 8 Principle of advanced super rapid cooling

4ゾーンあるいは5ゾーンに分けることが一般的である。高温のガスは浮力で上方へ動こうとする性質があるため、複数ゾーンのヒータのなかで下方のヒータをOFFにすると上の方は熱い領域、下の方は冷たい領域に分かれる。例えば、4ゾーンヒータで上2ゾーンを加熱、下2ゾーンをOFFとすると、図8に示すように、上半分が熱い領域、下半分は冷たい領域となる。

前述のように、新型急速冷却方式においては第2環流は、処理空間の上方から処理室へガスが導かれる構造となっている。このため、上半分だけを熱い領域とした場合には、第2環流は上半分の熱い領域を冷却することとなる。このとき、上半分の熱いガスは下半分の冷たい領域を通り、この領域で冷やされてから第1環流と合流する。すなわち、下半分の冷たい領域は、冷却時には蓄熱器として働くことになる。

したがって、この方式によれば通常の急速冷却と超急冷とで炉構造体を交換する必要がなく、処理品の設置場

所を処理空間上方の一部に制限して制御方法を変更するだけで超急冷が可能となる。

4.2節で紹介した商用第1号機にて行った試験では、空炉において

・1,150℃から800℃まで：約300℃/min

・800℃から600℃まで：約200℃/min

と、通常の冷却速度40℃/minと比較して5～8倍程度の冷却速度を実現した。また、冷却速度に余裕のある、例えば120℃/minなどの冷却速度では、PID制御によって安定的に冷却速度を制御することができた。

この超急冷法を用いれば、蓄熱器や専用の加熱装置などを別途用意することなく、冷却速度を大幅に向上させることができる。

むすび = HIP装置においては、生産性向上が大きな課題

となっていたなか、当社はその課題を解決する新型急速冷却方法を開発した。内面冷却容器を採用した大型HIP装置にその新型急速冷却方法を搭載し、生産性の大幅な向上に寄与することを確認した。また、HIP処理後に焼入れなどの熱処理が行われることが多いが、300℃/minという超急冷技術を得たことによって、後工程としての熱処理をHIP処理に取り込むことができ、生産性向上にいつそう寄与できると考える。さらに、高温高压と急速冷却の組み合わせによって、新しい特徴を持った材料を創出できる可能性もでてきている。今後、HIPの需要がさらに広がることが期待でき、これからもHIP装置技術の向上に尽力する所存である。

参 考 文 献

- 1) 石井孝彦ほか. R&D神戸製鋼技報. 1990, Vol.40, No.4, p.14.
- 2) 石井孝彦ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.104.
- 3) 守時正人ほか. R&D神戸製鋼技報. 1981, Vol.31, No.1, p.50.